4 种常见乔木单根拉伸的应力应变曲线分析

王萍花，陈丽华，冀晓东，宋恒川，郭 峰，汲文献
（北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室，北京 100083）

摘　要： 选取华北地区河北省北沟林场 4 种常见乔木油松、白桦、落叶松、蒙古栎进行拉伸试验，分析了直径、根长和拉伸速率对其应力应变曲线的影响。试验结果表明，乔木单根的应力应变曲线整体都为单峰曲线，没有出现明显的径缩现象，4 种乔木的应力应变曲线都表现出弹塑性材料特征。相同加载条件，同一直径径级水平下，白桦和蒙古栎的抗拉力学性能比较接近，均具有较大的弹性模量、抗拉强度和较小的极限延伸率；油松和落叶松的力学性能接近，具有较小的弹性模量及抗拉强度和较大的极限延伸率。随着直径的增加，乔木根的弹性模量、极限延伸率和抗拉强度均降低。随着根长的增加，落叶松的弹性模量表现为下降的趋势，而其余 3 种乔木的弹性模量均表现出上升的趋势。极限延伸率、抗拉强度均与根长成负相关。速率的增加使得根系更容易被拉断破坏，白桦和落叶松的弹性模量、抗拉强度均与拉伸速率成负相关，极限延伸率与拉伸速率成正相关。

关键词： 乔木；应力应变曲线；单根拉伸；弹性模量
文献标识码： A　　**文章编号：** 1000-288X(2012)03-0017-06　　**中图分类号：** S714.7

Analysis of Stress－Strain Curves for Four Common Arbor Root Systems

WANG Ping-hua, CHEN Li-hua, JI Xiao-dong, SONG Heng-chuan, GUO Feng, JI Wen-xian
(*Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of the Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to investigate the influences of root diameter, root length and tensile rate on stress—strain curve, four common arbor root systems, i. e., *Pinus tabulaeformis*, *Betula platyphylla*, *Quercus mongolica* and *Larix gmelinii*, were selected to perform tensile experiments. Results show that the overall stress—strain curve of every single arbor root system is the single-peak curve and does not have the apparent size-shrink phenomenon. Stress—strain curves for the four trees present elastoplastic material characteristics. Under the same loading condition and with the same diameter size, *Betula platyphylla* performs the tensile mechanical properties close to *Quercus mongolica*, both of which have larger elastic modulus and tensile strength and smaller elongation; *Pinus tabulaeformis* and *Larix gmelinii* have similar mechanical properties, with smaller elastic modulus and tensile strength and larger elongation. With the increase in root length, elastic modulus of *Larix gmelinii* manifests a downward trend, whereas elastic moduli of the other three trees manifest an increasing trend. Both of the ultimate elongation and tensile strength are negatively correlated with the root length. For *Betula platyphylla* and *Larix gmelinii*, the increase in tensile rate makes roots to be failure more easily; elastic modulus and tensile strength are negatively correlated with tensile rate; and ultimate elongation is positively correlated with and the tensile rate.

Keywords: arbor; stress－strain curve; single-root tensile; elastic modulus

植物根系是陆地生态系统中一个重要的组成部分。它不但可以传输与吸收溶质与水分，同时还有支撑树体与固结土体的重要作用，因而能够增强土壤抗冲能力，稳定斜坡，减缓浅层滑坡、崩塌等重力侵蚀[1-2]。近 30 a 来，随着科学技术的不断发展与生态环境建设的需求的增多，根系固坡的研究成为根系研

收稿日期： 2011-04-20　　**修回日期：** 2011-09-15
资助项目： 国家林业局林业公益行业科技专项“华北土石山区典型森林生态系统健康维护机制研究”(200804022)；中国教育部博士基金项目“林木根系拉伸特性的试验研究”(20090014110002)；国家自然科学基金项目“林木根系基本力学性能研究”(30872067)；青年科学基金项目“林木根系与土壤摩擦锚固性能研究”(30901162)
作者简介： 王萍花(1988—)，女(汉族)，湖南省浏阳市人，硕士研究生，研究方向为林木根系固土、水土保持。E-mail: wangpinghua319@yahoo.com.cn。
通信作者： 陈丽华(1957—)，女(汉族)，北京市人，教授，博导，研究方向为流域治理、森林水文、城镇规划等。E-mail: c_lihua@bjfu.edu.cn。

究的热点。根系固坡力学机制的研究成为一个正在拓展的具有学科交叉性的新领域[3]。植被根系对斜坡的稳定加固作用机制之一是其具有较强的抗拉特性和变形能力。木本植物根系通过侧根、须根、缠绕加固土壤形成紧密层,垂直根锚固斜坡土壤增加滑动阻力[4-5]。通常情况下植物根系的抗张或抗拉力的作用的概率比受剪切力作用的概率要大,因为根系与土壤在共同黏附力作用下形成活性有机体,在土壤受侵蚀条件下根系受到的剪切压力会变形拉直从而转为拉力的作用,因此单根的应力应变曲线是揭示根系抗拉过程的基础。不同树种、树龄、树木根系的不同长度、不同根径以及不同的拉伸速率都有可能对其本构关系产生影响,而根系的本构关系对其护坡性能具有重要的意义[6]。目前,很多学者已经开始重视对植物根系力学的研究,但因为植物根系分布复杂,处于地下不易观察,同时采样需要破坏树木环境,使工作难度增加,限制了对其进行深入系统的研究。本文以华北地区围场林场4种常见乔木油松(*Pinus tabulaeformis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)为研究对象,综合考虑各方面因素的影响,对其本构关系进行分析研究,以期揭示乔木植物根系的应力应变关系,为实际造林工作提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验植物采集

试验研究区选在木兰国营林场下属北沟林场,位于河北省围场县,地理坐标为东经116°32′—118°14′,北纬41°35′—42°40′,该区气候四季分明。以林场中4种常见乔木植物油松、白桦、落叶松、蒙古栎为研究对象。于2009年8月19—20日第1次取树龄23 a的油松,树龄20 a的白桦,树龄25 a的落叶松;2009年10月23—24日第2次取树龄28 a的油松,树龄17 a的白桦,树龄25 a的落叶松,树龄23 a的蒙古栎。这4种乔木植物根系均为主直根系,根系强大,入土较深。

树木根系采集使用完全挖掘法。选取与其他林木间隔较大的树木,伐倒地上部分,切下圆盘,数年轮测出树龄。完全挖出地下部分所有树根,经破碎过筛,清洁根系表面,用卷尺量取长度分类之后,将取好的根样用密封袋保存,送往实验室冷藏保存在冰箱4 ℃环境下。取得的试样在2个月内进行试验。

1.2 植物根系抗拉力试验

本实验采用微机控制电子式万能试验机,型号WDW-100E,试验力测量范围400～100 kN,全程自动换挡,速度0.001～500 mm/min。

实验时选取直径变化不大,顺直少弯曲,表皮较完好的根系。在树根上等分4个部分,作3处记号,用游标卡尺依次测量3个点处直径,然后取其平均值作为该树根直径。调整万能试验机标据为实验设计中的设定根长,将树根两端伸入夹具5 mm,拧紧夹具将树根固定好,开动机器以实验设计的速度匀速拉伸树根直至完全拉断。根系总在最细处断裂,断裂面参差不齐,并且有明显颈缩。

根据力学试验理论,根系在受力时,可能由于被夹具夹断而断裂,所以在试验过程中,认为根系断裂处明显远离夹具时的试验为成功试验,数据有效。当直径大于4 mm以上时,根系往往会由于抗拉强度过大而在夹具处断裂或者从夹具滑出,致使实验失败,所以夹具的改造与加工成为实验的一个重要环节。本实验使用变口径钢制夹具,直径可在0～14 mm范围调节,以适应不同直径段的根系。将1.5～2.5 mm的根视作径级为2 mm的极细根,3.5～4.5 mm的根视作径级为4 mm的细根。对2个径级、3个根长和2个拉伸速率的根重复试验10组(表1),每组重复3根,最终用于分析的根系力学特性指标值是将多组重复试验中成功试验的测定值取平均值。

表1 研究不同影响因素对植物单根拉伸应力应变关系作用的实验设计

影响因素	试验树种	直径/mm	根长/mm	拉伸速率/(mm·min^{-1})
Ⅰ树种	油松、白桦、落叶松、蒙古栎	2.0,4.0	50	10
Ⅱ直径	油松、白桦、落叶松、蒙古栎	2.0,4.0	50	10
Ⅲ根长	油松、白桦、落叶松、蒙古栎	2.0	50,100,250	10
Ⅳ拉伸速率	白桦、落叶松	2.0	100	10,400

1.3 植物根系力学原理

$$P=4F_{max}/\pi D^2 \quad (1)$$

$$\sigma=4F/\pi D^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon=\Delta L/L \quad (3)$$

$$E_{0.4}=\sigma_{0.4}/\varepsilon_{0.4} \quad (4)$$

式中:P——单根抗拉强度(MPa);F——抗拉力(N);σ——应力(MPa);D——根系平均直径(mm);因为测定单根在拉伸过程中其截面积及其变化存在

一定困难，故本研究采用 Lagrange 的定义，认为实验过程中的直径都为单根加载前的直径(mm)；ε——纵向线应变即延伸率；ΔL——单根拉伸时的伸长量(mm)；L——单根的原始长度，本研究中称为标距(mm)；$E_{0.4}$——抗拉强度极限 40%时的弹性模量(MPa)，一般而言，植物弹性极限为抗拉强度极限的 50%～70%[7-8]，所以本试验弹性模量取 40%极限应力时的抗拉割线模量，即 $E_{0.4}=\sigma_{0.4}/\varepsilon_{0.4}$。

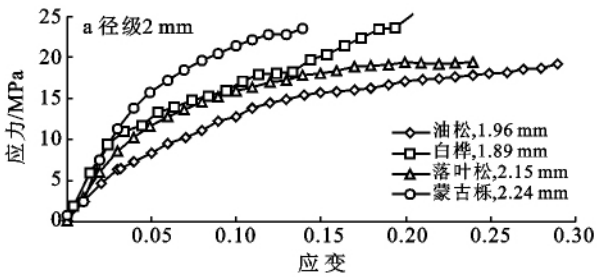
2　结果与分析

一系列单根拉伸的力学性能指标都能从其应力应变曲线中表达出来。应力应变曲线的斜率，即随着应变的增加，所增加的应力。材料在弹性范围内拉伸应力与相应拉伸应变之比即弹性模量，材料的弹性模量表征了材料抵抗弹性变形的能力。因此，乔木应力应变曲线初始线性阶段的斜率即为单根拉伸的弹性模量。

植物根系的形变决定了单根受外力时的整体应变状态，应力应变曲线中的最大应变即极限延伸率，所以极限延伸率可以表现根系抵抗土体滑坡的能力，极限延伸率较大的根系有利于使根系所受的拉力向根系侧摩阻转化而使根系本身所受的内力减小，这样有利于提高根系固土能力[9-10]。应力应变曲线中的最大应力，即抗拉强度，抗拉强度越大，表明单根具有更好的护坡能力。

2.1　同一径级下，4 种植物的应力应变曲线

图 1a—1b 是相同直径乔木根系之间应力应变的比较。由图 1 可见，不同乔木由于树种根系组成结构不同，根系力学性质差异较大，造成根系抗拉应力—应变曲线特征也不同。



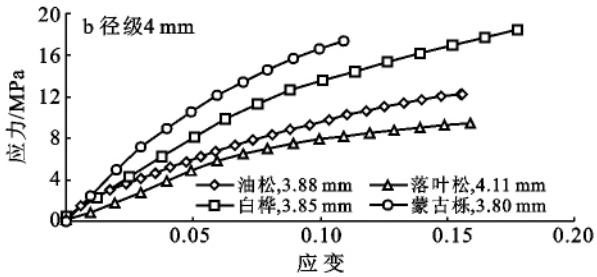


图 1　4 种植物同一径级根的应力应变曲线

由图 1a 可见，在 2 mm 的径级水平下，弹性模量蒙古栎最大，白桦和落叶松比较接近，油松最小；图 1b，在 4 mm 的径级水平下，弹性模量：蒙古栎＞白桦＞油松＞落叶松。说明 4 种乔木中，蒙古栎适应变形的能力最强，油松和落叶松适应变形的能力弱，白桦介于它们之间。通过对比分析应力应变曲线的极限应变，可以发现，图 1a 中，在直径径级较小时，极限延伸率：油松＞落叶松＞白桦＞蒙古栎，规律比较明显。但直径径级较大时，如图 1b 所示，极限延伸率仍以蒙古栎最小，但另外 3 种乔木，基本一致。说明直径对不同树种单根的延伸特性影响的程度不一。分析应力应变曲线的极限应力，可以发现，抗拉强度：白桦＞蒙古栎＞油松＞落叶松。在直径径级增加时，规律更为明显。

因此，白桦和蒙古栎的抗拉力学性能比较接近，均具有较强的适应变形的能力、抗拉能力和较差的延伸性；油松和落叶松的力学性能接近，具有较好的延伸性和较弱的适应变性的能力、抗拉能力。

2.2　直径对根的应力应变曲线的影响

从图 2 中可以看出，乔木单根的应力应变曲线整体都为单峰曲线，没有出现明显的径缩现象。4 种乔木的应力应变曲线都表现出弹塑性材料特征，只是在受拉的初期阶段，荷载、变形、应力、应变按比例增加，表现为弹性材料特征；应力超过弹性极限，根系变形迅速进入弹塑性变形阶段，应变出现相对急速的增长，而应力却没有相应大的增长，因而应力应变曲线变的平缓，斜率减少并上凸，直至达到根系的极限应力，根系断裂。如图 2a—2d 所示，在直径径级较小时，4 种乔木根系在受力初期均表现出较好的线弹性关系，应力应变成比例增加，且增幅较大，线性区间明显；在直径径级较大时，4 种乔木根系应力随应变递增缓慢，曲线平缓，线性区间不明显，表现出塑性特性。这些应力应变特征表明，当土体间出现滑坡裂缝时，快速增长的应变有利于把根系所受的拉力向土体深层传递，同时在根系伸长系数较大的情况下，受拉过程中根系的形变量较大有利于对土壤下滑力进行缓冲，提高根系固土能力。

通过对比分析图 2a—2d 应力应变曲线，直径较小根系的曲线表现出较明显的非光滑性的特征，这是与软钢的受拉应力应变全曲线不同的显著特征；随着径级的增大，根系的应力应变曲线却光滑，说明同样的外界加载条件，直径较小的根系对外界拉力的缓冲

能力比直径大的根系缓冲能力大。图2b中，对白桦而言，初始阶段，细根的弹性模量略小于粗根的弹性模量，可能原因是实验开始过时，夹具略有滑动造成；之后，白桦细根的应力应变特征表现为，随着应变的增加，应力急剧增加，而粗根应力的增加趋势相对缓慢一些，此时，细根的弹性模量大于粗根的弹性模量。而另外3种乔木较小直径根的应力应变曲线均包覆在较大直径根的应力应变曲线上方，表明随着直径的增加，其弹性模量减小，即细根较粗根有更好的抵抗弹性变形的能力。因此，可以认为，乔木根的弹性模量与其直径成负相关关系。

通过对比不同径级根应力应变曲线中的极限应变（极限延伸率）和极限应力（抗拉强度），可以发现，细根比粗根有更大的极限应力和极限应变，这充分说明随着直径的增加，乔木根系的极限延伸率和抗拉强度均降低。

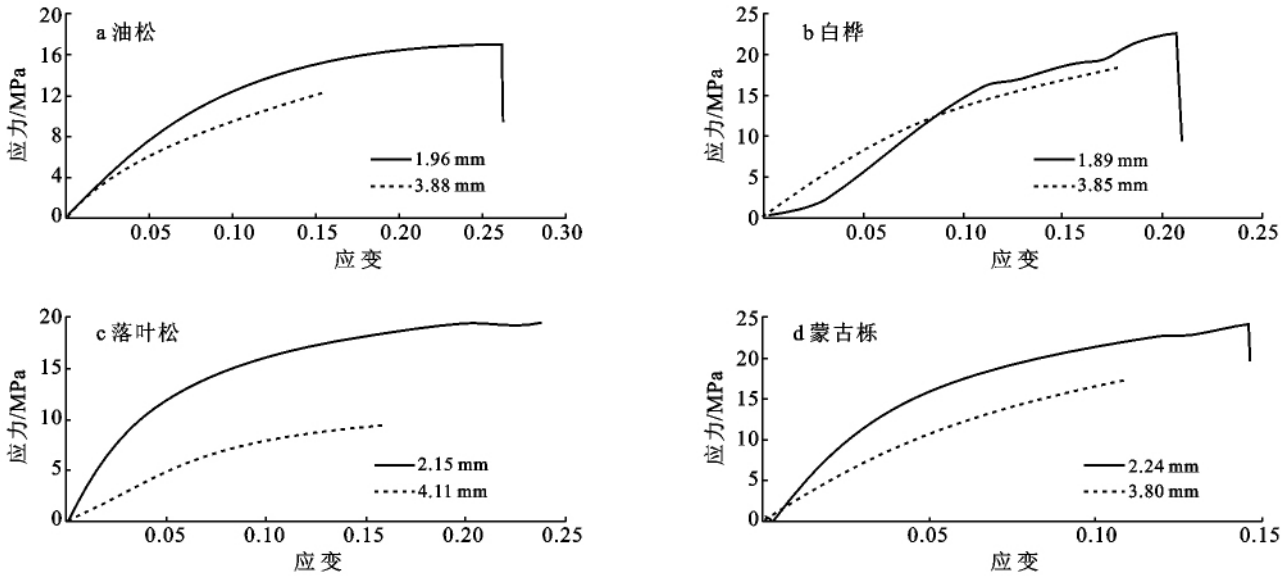


图2 4种乔木2个不同径级水平的应力应变曲线

因此，同样的加载条件下，细根对外界拉力的缓冲能力、抵抗弹性变形的能力、抵抗土体滑坡的能力均比粗根强，即在固土护坡的过程中，细根的作用效果比粗根好。这种现象可能是由于根系组分的差异造成的，因为小根系单位干重的纤维素含量比大的根系多[10]。

2.3 根长对根的应力应变曲线的影响

选取4种根径径级2 mm，根长分别为50，100，250 mm的植物做应力应变曲线（如图3所示）。从图3中可以看出，每种乔木，不同根长的应力应变曲线变化趋势基本一致。

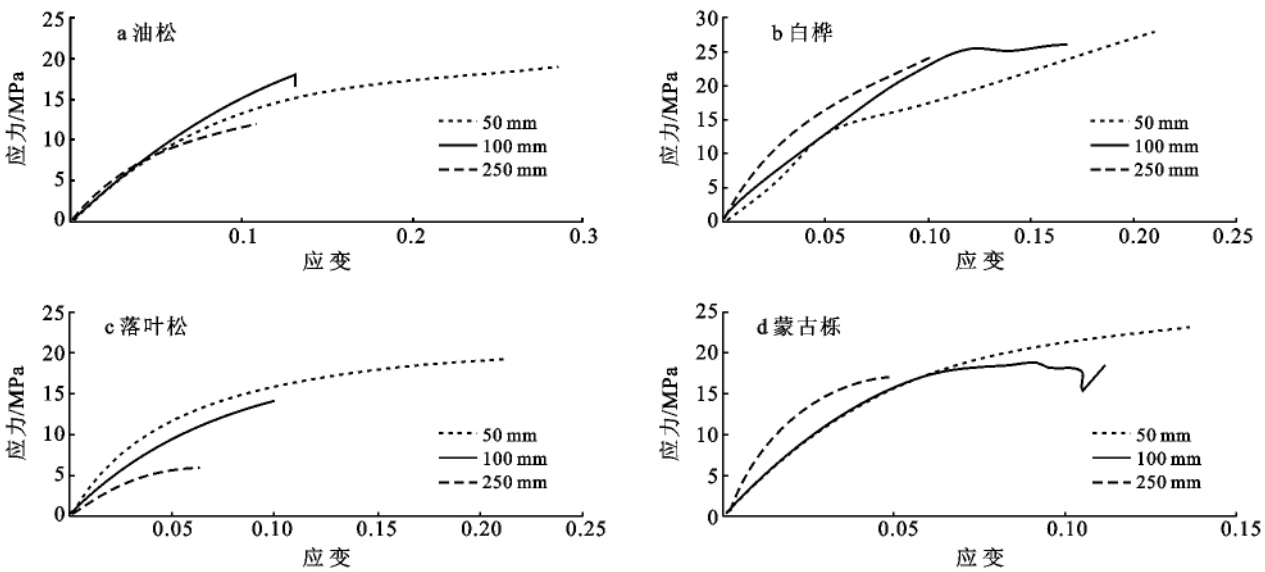


图3 同一直径水平下4种乔木3个不同根长的应力应变曲线

从图 3 可以看出，除落叶松外其余 3 种乔木的应力应变曲线中，初始线弹性阶段随着应变的增加，根长较大的根的应力增加趋势大于根长较小的根，说明随着根长的增加，弹性模量明显增加。落叶松却恰好相反，根长较小根的应力应变曲线包覆着根长较大根的应力应变曲线，说明随着根长的增加，落叶松的弹性模量减小。

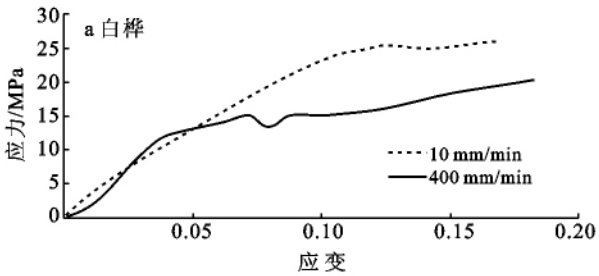
随着根长的增加，4 种乔木的极限应变明显下降，而极限应力略有下降。这说明极限延伸率、抗拉强度均与根长成负相关。

2.4　拉伸速率对根的应力应变曲线的影响

取白桦和落叶松根长为 100 mm，直径径级水平为 2 mm，分别以 10 mm/min 和 400 mm/min 的拉伸速率对其进行拉伸试验，得到的应力应力曲线如图 4 所示。

通过试验发现，400 mm/min 下根系拉伸破坏比 10 mm/min 更容易更快，说明速率的增加使得根系更容易被拉断破坏。

从图 4 可知，2 种乔木的弹性模量均随着拉伸速率的增加而减小，极限应变（极限延伸率）随着拉伸速率的增加而增加，极限应力（抗拉强度）却随着拉伸速率的增加而略有减小。根系在 10 mm/min 拉伸速率下大多是弹性断裂，但在 400 mm/min 下大多为脆性断裂。断口平滑，且断裂处颈缩不明显，根系的弹性变形没有完全进行后就进入了塑性变形，力学性能没有完全释放，使得抗拉强度有所降低，说明拉伸速率对根系力学性质有影响。当土体发生滑坡时，正因为滑动速度过快使得根系力学性能降低，更易被拉断，造成了较大的破坏。



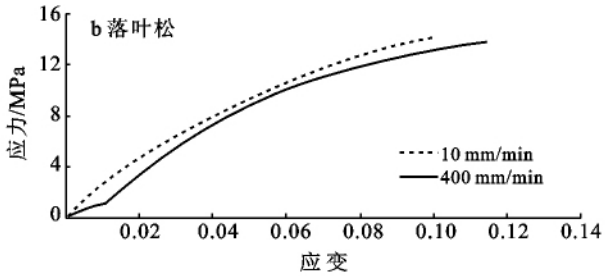


图 4　相同根长和直径水平下 2 种乔木不同拉伸速率的应力应变曲线

3　结 论

本文仅考虑了树种、直径、根长和拉伸速率对根的应力应变曲线的影响，得出能反映在应力应变曲线上的包括弹性模量、抗拉强度以及极限延伸率等力学性能的变化趋势，但其具体的变化规律和变化幅度无法在应力应变曲线上体现，仍需进一步单独统计分析。

为了更深入地了解植物根系的固土护坡特性，还需要进行剪切实验。同时，目前对植物单根抗拉特性研究，基本集中在根系宏观几何特性，如根径、根长和根表面积与根系抗拉强度的关系上[11]。而对植物根系的组成材料与力学性质关系方面的研究很少，且缺乏系统性，根系的主要细胞成分是（木）纤维，而且纤维群是根系中的机械组织，与根系的力学性质有重要关系，纤维解剖特征上的特点，有利于探求根系结构与根系力学性质的关系。因此需要进一步对根系进行形态解剖观察及纤维素、半纤维素等的定量分析，以揭示植物影响根系力学特性的主要结构因子[12]。

（1）根长 50 mm，拉伸速率 10 mm/min 下，同一直径径级水平下，白桦和蒙古栎的抗拉力学性能比较接近，均具有较大的弹性模量、抗拉强度和较小的极限延伸率；油松和落叶松的力学性能接近，具有较大的极限延伸率和较小的弹性模量及抗拉强度。具体规律表现为，4 种乔木的抗拉强度：白桦＞蒙古栎＞油松＞落叶松，在直径径级增加时，规律更为明显；在 2 mm 径级水平下，弹性模量：蒙古栎＞白桦＞落叶松＞油松，极限延伸率：油松＞落叶松＞白桦＞蒙古栎；在 4 mm 径级水平下，弹性模量：蒙古栎＞白桦＞油松＞落叶松，极限延伸率：蒙古栎最小，其余 3 种乔木大小规律不明显。

（2）乔木单根的应力应变曲线整体都为单峰曲线，没有出现明显的径缩现象。4 种乔木的应力应变曲线都表现出弹塑性材料特征，在直径径级较小时，4 种乔木根系在受力初期均表现出较好的线弹性关系，线性区间明显；在直径径级较大时，4 种乔木根系应力随应变递增缓慢，曲线平缓，线性区间不明显，表现出塑性特性。直径较小根系的曲线表现出较明显的非光滑性的特征，随着径级的增大，根系的应力应变曲线却光滑，说明同样的外界加载条件，直径较小的根系对外界拉力的缓冲能力比直径大的根系缓冲能力大[5]。通过分析同一乔木不同直径水平下的应力应变曲线，发现随着直径的增加，乔木根的弹性模量、极限延伸率和抗拉强度均降低。

(3) 拉伸速率 10 mm/min，直径径级水平为 2 mm下，随着根长的增加，4 种乔木极限应量变明显下降，而极限应力略有下降，说明极限延伸率、抗拉强度均与根长成负相关。随着根长的增加，落叶松的弹性模量表现为下降的趋势，而其余 3 种乔木的弹性模量均表现出上升的趋势。

(4) 根长为 100 mm，直径径级水平为 2 mm 下，白桦和落叶松的根系在拉伸速率 10 mm/min 时大多是弹性断裂，但在 400 mm/min 拉伸速率下大多为脆性断裂，断口平滑，且断裂处颈缩不明显。且 400 mm/min下根系拉伸破坏比 10 mm/min 更快，说明速率的增加使得根系更容易被拉断破坏[5]。2 种乔木的弹性模量均随着拉伸速率的增加而减小，极限应变(极限延伸率)随着拉伸速率的增加而增加，极限应力(抗拉强度)却随着拉伸速率的增加而略有减小。

[参 考 文 献]

[1] 刘建军. 林木根系生态研究综述[J]. 西北林学院学报，1998，13(3)：74-78.

[2] 谢春华，关文彬，张东升，等. 长江上游暗针叶林生态系统主要树种的根系结构与土体稳定性研究[J]. 水土保持学报，2002，16(2)：76-79.

[3] 程洪，张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报，2002，22(5)：20-23.

[4] Bischetti G B，Chiaradia E A，Simonato T，et al. Root streng and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. Plant and Soil，2005，278：11-22.

[5] 杨永红，刘淑珍，王成华，等. 浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究[J]. 水土保持研究，2007，14(1)：138-140.

[6] 陈丽华，余新晓，刘秀萍，等. 林木根系本构关系[J]. 山地学报，2007，25(2)：224-228.

[7] 刘秀萍，陈丽华，宋维峰，等. 油松根系抗拉应力：应变全曲线试验研究[J]. 中国水土保持科学，2006，4(2)：66-70.

[8] 程建峰，潘晓云，刘宜柏. 作物根系研究法最新进展[J]. 江西农业学报，1999，11(4)：55-59.

[9] 朱清科，陈丽华，张东升，等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报，2002，24(4)：64-67.

[10] 朱海丽，胡夏嵩，毛小青，等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(S2)：3445-3452.

[11] Genet M，Stokes A，Salin F，et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [J]. Plant Soil，2005，278：1-9.

[12] Commandeur P R，Pyles M R. Modulus of elasticity and tensile strength of Douglas fir roots[J]. Can. J. For. Res.，1991，21：48-52.

(上接第 10 页)

[4] 徐敬华，王国梁，陈云明，等. 黄土丘陵区退耕地土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 中国水土保持科学，2008，6(2)：19-25.

[5] 纳磊，张建军，朱金兆，等. 晋西黄土区不同土地利用类型坡面土壤饱和导水率研究[J]. 水土保持研究，2008，15(3)：69-73.

[6] 程冬兵，李朝霞，蔡崇法，等. 等高绿篱系统土壤水分入渗特性研究[J]. 水土保持学报，2009，23(3)：221-226.

[7] 陈建刚，李启军，侯旭峰，等. 妫水河流域不同植被覆盖条件下土壤入渗及模型的比较分析[J]. 中国水土保持科学，2004，2(3)：22-26.

[8] 戴长雷，孙思淼，叶勇，等. 高寒区土壤包气带融雪入渗特征及其影响因素分析[J]. 水土保持研究，2010，17(3)：269-272.

[9] 吴发启，赵西宁，余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. 水土保持通报，2003，23(1)：16-18.

[10] 陈洪松，邵明安，王克林，等. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报，2006，22(1)：44-47.

[11] Nadler A，Perfect E，Kay B D K，et al. Effect of two polymers and water qualities on dry cohesive strength of three soil[J]. Soil Sci. 1996，60(2)：556-561.

[12] Sojka R E，lentz R D，Ross C W，et al. Polyacrylamide effects on infiltration in irrigated agriculture[J]. Soil Water Cons.，1999，53(4)：325-331.

[13] 张振华，谢恒星，刘继龙，等. 气相阻力与土壤容重对一维垂直入渗影响的定量分析[J]. 水土保持学报，2005，19(4)：36-39.

[14] Baunhards R L. Modeling infiltration into sealing soil [J]. Water Resource Res.，1990，26(1)：2497-2505.

[15] Dao T H. Tillage and winter wheat residue management effects on water infiltration and storage[J]. Soil Science Society of America Journal，1993，157：1586-1594.

[16] 李卓，吴普特，冯浩，等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟实验[J]. 农业工程学报，2009，25(6)：40-45.

[17] Helalia A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soil [J]. Agricultural Water Management，1993，24(5)：39-47.